

# Document made available under the Patent Cooperation Treaty (PCT)

International application number: PCT/EP05/003110

International filing date: 23 March 2005 (23.03.2005)

Document type: Certified copy of priority document

Document details: Country/Office: DE  
Number: 10 2004 014 820.1  
Filing date: 24 March 2004 (24.03.2004)

Date of receipt at the International Bureau: 29 April 2005 (29.04.2005)

Remark: Priority document submitted or transmitted to the International Bureau in compliance with Rule 17.1(a) or (b)



World Intellectual Property Organization (WIPO) - Geneva, Switzerland  
Organisation Mondiale de la Propriété Intellectuelle (OMPI) - Genève, Suisse

# BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND



## Prioritätsbescheinigung über die Einreichung einer Patentanmeldung

**Aktenzeichen:** 10 2004 014 820.1

**Anmeldetag:** 24. März 2004

**Anmelder/Inhaber:** Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der ange-wandten Forschung eV, 80686 München/DE

**Bezeichnung:** Verfahren zum Bohren von metallischen Werkstoffen sowie von geschichteten metallischen Werkstoffen und solchen, die mindestens eine keramische Schicht aufweisen

**IPC:** B 23 K 26/073

**Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ur-sprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.**

München, den 08. April 2005  
Deutsches Patent- und Markenamt  
Der Präsident  
im Auftrag

A handwritten signature in black ink, appearing to read "M. Sieck".

Sieck

Fraunhofer-Gesellschaft zur  
Förderung der angewandten Forschung e.V.  
Hansastraße 27c  
80686 München

24. März 2004 (ILT/LLT)

### **Patent anmeldung**

„Verfahren zum Bohren von metallischen Werkstoffen sowie von geschichteten metallischen Werkstoffen und solchen, die mindestens eine keramische Schicht aufweisen“

Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zum Bohren von metallischen Werkstoffen sowie von geschichteten metallischen Werkstoffen und solchen, die mindestens eine keramische Schicht aufweisen, mittels Laserstrahlung, wobei die Intensität des Laserstrahls abhängig von der geforderten geometrischen Form der Bohrung eingestellt wird.

Laserstrahlung wird insbesondere zum Abtragen und Bohren von metallischen Werkstoffen und von Verbundwerkstoffen aus dielektrischen (z. B. keramischen) und metallischen Schichten eingesetzt. Insbesondere bei den Anwendungen in der Automobiltechnik, der Luftfahrttechnik (Fein- bzw. Mittelblech) und der Energietechnik (Mittelblech) sind große Abtragsraten (große Produktivität) und große Aspektverhältnisse (Tiefe zu Durchmesser) erwünscht. Die geometrische Form der Bohrung (z. B. zylindrisch, konisch) und die Morphologie der Bohrungswand (z. B. erstarrte Schmelze) sind wesentliche Qualitätsmerkmale und unterliegen vorgegebenen technischen Anforderungen.

Die bekannten Techniken zum Bohren mit Laserstrahlung werden durch den dominanten Mechanismus zum Austreiben des Werkstoffes beim Bohren – Schmelzen, Verdampfen – in zwei Gruppen eingeteilt:

- Bohrtechniken mit dominantem Schmelzaustrieb

Bohrtechniken mit dominantem Schmelzaustrieb sind das Einzelpulsbohren, das Perkussionsbohren (Mehrfachpulse) und das Trepianierbohren. Diese Techniken haben den Vorteil großer Abtragsraten (Produktivität) und den Nachteil mangelnder Qualität durch unvollständigen Schmelzaustrieb, Ablagerungen aus erstarrter Schmelze an der Bohrungswand und/oder am Bohrungsein- und -austritt und geringer Präzision bezüglich des Bohrungsdurchmessers. Beim Trepianierbohren wird zunächst eine Perkussionsbohrung in den Werkstoff eingebracht und nachfolgend eine Bohrung mit definiertem Radius ausgeschnitten. Das Trepianierbohren hat den Nachteil, dass die größte Menge an entstehender Schmelze durch einen Prozessgasstrahl am Bohrungsaustritt ausgetrieben wird und so der Innenraum eines zu bohrenden Hohlkörpers verschmutzt wird.

Der Stand der Technik beschreibt eine Vielzahl von Maßnahmen, die darauf zielen, die Schmelze möglichst vollständig auszutreiben und eine definierte – meist zylindrische – Form der Bohrung zu erreichen. Diese Maßnahmen sind

- Vergrößern des räumlichen Mittelwertes oder des Maximalwertes der Intensität im Laserstrahl mit zunehmender Tiefe der Bohrung
- Zeitliche Modulation (Perkussion) der Intensität mit einer großen Anzahl von Einzelpulsen während der gesamten Bohrzeit.

Das Perkussionsbohren wird industriell nur dann eingesetzt, wenn die mangelnde Qualität (unvollständiger Schmelzaustrieb, anhaftende erstarrte Schmelze, geringe Präzision der Bohrungsform) die Funktion des Produktes nicht einschränkt.

Nach dem Stand der Technik zum Einzelpuls- und Perkussionsbohren wird die Intensität mit zunehmender Tiefe der Bohrung vergrößert, um z. B. die Auswirkung einer Strahlaufweitung zu kompensieren. Die Modulation der Intensität wird durchgeführt, um z. B. durch Variation des Verhältnisses von Pulsdauer zu der Zeit zwischen zwei Pulsen den geforderten Durchmesser der Bohrung zu verändern.

Nach EP 0 796 695 A1 kann der Austrittsdurchmesser der Bohrung, der üblicherweise kleiner ist als der Durchmesser des oberen Teils der Bohrung, vergrößert werden, wenn die Temperatur des Werkstückes um mindestens 25 °C über der Umgebungstemperatur liegt.

Bohrtechniken mit dominantem Verdampfen

Zum Bohren durch dominantes Verdampfen werden die Techniken Wendelbohren, Perkussionsbohren und Laser-Erodieren eingesetzt.

Ein gezieltes Erreichen der geforderten geometrischen Form der Bohrung ist bis heute nur mit dem Wendelbohren oder einer Kombination aus Perkussions- und Wendelbohren erreichbar.

Nach DE 101 44 008 A1 kann eine mit überwiegendem Schmelzaustrieb hergestellte Perkussionsbohrung in einem zweiten Verfahrensschritt durch dominantes Abtragen als Dampf auf den gewünschten Durchmesser aufgeweitet werden, so dass keine Reste erstarrter Schmelze an der Bohrungswand zurückbleiben. Diese hochpräzise Bohrtechnik und auch die Verfahrensvarianten weisen den Nachteil zu großer Bohrdauer bzw. zu kleiner Produktivität auf.

Der vorliegenden Erfindung liegt nun die Aufgabe zugrunde, die vorstehend aufgeführten Unzulänglichkeiten des Stands der Technik zu beseitigen und das eingangs genannte Verfahren so weiterzubilden, dass insbesondere ein vollständiges Austreiben der Schmelze beim Bohren in Richtung der einfallenden Laserstrahlung aus dem Bohrungsschacht ohne Ablagerungen erstarrter Schmelze an dem Bohrungsrand gewährleistet wird.

Gelöst wird diese Aufgabe, ausgehend von dem Verfahren mit den eingangs genannten Merkmalen dadurch, dass die räumliche Verteilung der Intensität im Laserstrahl, bezogen auf den sich ändernden Boden der Bohrung, so eingestellt wird, dass die Intensität über eine genügend große Strecke  $w_0$  mit dem Abstand  $w$  von der Laserstrahlachse abfällt, dieser Abfall annähernd monoton erfolgt, und eine genügend

große räumliche Änderung  $\Delta I$  der Intensität  $I$  innerhalb der Strecke  $w_0$  eingehalten wird.

Mit dieser Verfahrensmaßnahme wird die herkömmliche Technik des Einzelpuls- und Perkussionsbohrens mit Laserstrahlung mit dominantem Schmelzaustrieb so gestaltet, dass ein vollständiges Austreiben der Schmelze aus der Bohrung möglich ist, ohne dass sich Schmelze an der Bohrungswand ablagert. Bei den bisher bekannten Verfahren wird der Schmelzaustrieb über ein laserinduziertes Plasma durch den räumlichen Mittelwert oder den Maximalwert der Intensität im Laserstrahl gesteuert, was eine gezielte Steuerung des Bohrungsdurchmessers und eine Vermeidung von Schmelzablagerungen nicht zulässt. Ein zweiter Verfahrensschritt zum Glätten der Bohrungswand durch Verdampfungsabtragen, wie dies in der DE 101 44 008 A1 beschrieben ist, ist nicht erforderlich.

Bevorzugte Ausgestaltungen des Verfahrens ergeben sich aus den Unteransprüchen.

Mit dem erfindungsgemäßen Verfahren ist eine gezielte Einstellung des Bohrungsdurchmessers auch während des Bohrprozesses möglich. Auch können unterhalb eines definierten Aspektverhältnisses von Bohrungstiefe zu Bohrungsdurchmesser in Abhängigkeit von der Tiefe beliebige Durchmesser mit hoher Präzision erzielt werden und zylindrische, konische und andere geometrische Formen der Bohrung können hergestellt werden.

Wesentliche Merkmale, die beim Schmelzbohren zuverlässig erreicht werden müssen, sind:

- reproduzierbarer Durchmesser

Der kleinste Durchmesser einer Bohrung bestimmt den Volumenstrom. Das gesamte Durchflussvolumen von Kraftstofffiltern addiert sich aus den Durchflussvolumen der einzelnen Bohrungen, die durch die jeweils minimalen Durchmesser der Bohrungen begrenzt sind.

- definierte Konizität

Das Strömungsverhalten beim Austreten von Gasen und Flüssigkeiten aus der Bohrung wird u. a. durch den Winkel der Bohrungswand zur Werkstoffoberfläche und die Aufweitung der Bohrung bestimmt. Die definierte Konizität ist z.B. entscheidend für die Verteilung von Kühlgasen auf Werkstoffoberflächen zum Schutz von Turbinenkomponenten.

- definierte Konizität beim Bohren von Mehrschichtsystemen

Die zylindrische bzw. konische Bohrungsgeometrie ist Voraussetzung für die laminaire Strömung von Flüssigkeiten und Gasen in der Bohrung. Der Durchmesser von Bohrungen in Turbinenkomponenten – z.B. Mehrschichtsysteme, bestehend aus dem Substrat, der Haftvermittlerschicht und der Wärmedämmsschicht – muss unabhängig von der Werkstoffschicht regelbar sein.

- keine Reduzierung der Haft- und Scherfestigkeit von Coatings

Beim Bohren von Mehrschichtsystemen darf die Haftung zwischen den Schichten im Bereich der Bohrung nicht reduziert werden. Bei Beschädigung der Wärmedämmsschicht von Turbinenkomponenten können sich die Schichten der im Betrieb thermisch und mechanisch hochbelasteten Komponenten vom Werkstoff lösen und ein Schutz ist nicht mehr gewährleistet.

- keine Ablagerungen erstarrter Schmelze

Ein definierter Bohrungsdurchmesser kann nur erreicht werden, wenn die geometrische Form der Bohrung nicht durch unregelmäßige Ablagerungen erstarrter Schmelze an der Bohrungswand verändert wird. In der erstarrten Schmelze können Risse und Spannungen entstehen. Bei hochbelasteten Komponenten, wie Turbinenschaufern und Kraftstofffiltern, erhöht das Vermeiden von Ablagerungen aus erstarrter Schmelze deren Lebensdauer.

- keine Gratbildung

Ein Grat aus erstarrter Schmelze am Bohrungsaustritt vergrößert z.B. den Strömungswiderstand und vermindert so den Wirkungsgrad. Das Vermeiden der Gratbil-

dung erfordert keine Nachbearbeitung und verkleinert die Produktionszeit beispielsweise von Turbinenkomponenten und Kraftstofffiltern.

- Austreiben der Schmelze in Richtung der einfallenden Laserstrahlung

Das Ausströmen der Schmelze nach oben aus der Bohrung reduziert Verschmutzungen in Hohlkörpern. Beim Herstellen von Kraftstofffiltern und Turbinenschaufeln ist eine Nachbearbeitung (Reinigen) erforderlich, wenn sich während des Bohrens Werkstoffrückstände in den Hohlkörpern ablagern.

- große Krümmung der Austrittskante

Das Ablösen einer Flüssigkeitsströmung an der Bohrungsöffnung wird durch die Krümmung der Austrittskante bestimmt. Bei Einspritzdüsen ist die Krümmung der Austrittskante bestimmend für das Ablösen und das vollständige Abbrennen des Kraftstoffs im Brennraum.

Der Einzug von Umgebungsgasen in die Bohrung oder die Ablösung einer Kühlgasströmung vom Austritt einer Kühlbohrung in Turbinenschaufeln sind unerwünschte Eigenschaften der Strömung, deren Ausbildung von der geometrischen Form der Austrittskante abhängen.

Für die Erfindung ist von Bedeutung, dass als entscheidender Parameter für den vollständigen Schmelzaustrieb über eine vorgegebene Tiefe der Bohrung die räumliche Verteilung der Intensität im Laserstrahl am Bohrungsgrund geeignet eingestellt werden muss und nicht wie bisher bekannt der räumlich gemittelte Wert oder der Maximalwert der Intensität  $I_0$  im Laserstrahl. Kennzeichnend ist eine geeignete räumliche Verteilung der Laserstrahlung über eine genügend große Strecke  $w_0$  im Laserstrahl, innerhalb derer die Intensität mit dem Abstand von der Laserstrahlachse abfällt und eine genügend große räumliche Änderung der Intensität (Intensitätsgradient) vorliegt.

In der beigefügten Figur 1 sind die minimalen Werte für die Intensität  $I_0 = I_{min}$  und die Strecke  $w_0 = w_{min}$  skizziert, wobei für das Vorstehende Fall A gilt.

In einer bevorzugten Maßnahme wird die Strecke  $w_0$  annähernd proportional zur Wurzel der vordefinierten und zu erreichenden Bohrungstiefe  $\ell$  eingestellt.

Weiterhin sollte die räumliche Änderung  $\Delta I$  der Intensität  $I$  innerhalb der Strecke  $w_0$  annähernd proportional zu der vordefinierten bzw. zu erreichenden Bohrungstiefe  $\ell$  so eingestellt werden, dass ein Bohrungsradius  $r_B$  ( $r_B > w_0$ ) größer als die Strecke  $w_0$  erreicht wird.

Der minimale Durchmesser  $d_{min}$  ( $=2r_{Bmin}$ ) der Bohrung und das maximale Aspektverhältnis  $\alpha$  von Bohrungstiefe  $\ell$  zu Bohrungsdurchmesser  $d$  sollten nach folgender Vorschrift

$$\alpha < \text{const. } \Delta I w_0$$

eingestellt werden, wobei die räumliche Änderung  $\Delta I = I_0 - I_{w_0}$  der Intensität  $I$  innerhalb der Strecke  $w_0$  und  $I_0$  die Intensität auf der Laserstrahlachse und  $I_{w_0}$  die Intensität im Abstand  $w_0$  von der Laserstrahlachse ist.

Zur Vergrößerung des Bohrungsdurchmessers  $d$  ( $=2r_B$ ) während des Bohrens wird der Maximalwert  $I_0 > I_{min}$  für die Intensität so gesteuert oder geregelt, dass der Bohrungsdurchmesser  $d$  ( $=2r_B$ ) einen vorbestimmten von der Tiefe abhängigen Wert  $d > d_{min}$  erreicht, wobei  $I_0$  die Intensität auf der Laserstrahlachse ist und  $I_{min}$  der minimale Wert der Intensität  $I_0$  ist.

Weiterhin ist wesentlich, dass nach geeignetem Einstellen der räumlichen Verteilung der Intensität am Bohrungsgrund der minimale Bohrungsdurchmesser  $2r_{Bmin}$  und das maximale Aspektverhältnis von Bohrungstiefe zu -durchmesser bestimmt werden; hierzu sind in der Figur 1, Fall A, die entsprechenden Werte ( $I_0 = I_{min}$ ,  $w_0 = w_{min}$ ) dargestellt.

Um eine Vergrößerung des Bohrungsdurchmessers  $2r_B > 2r_{Bmin}$  auch während des Bohrprozesses zu erreichen, müssen der Maximalwert für die Intensität  $I_0 > I_{min}$  und/oder die Strecke  $w_0 > w_{min}$  gesteuert werden. Ein beliebiger größerer Durchmesser ist beispielsweise durch eine Vergrößerung der Intensität (siehe Figur 1, Fall

B) oder der Strecke (siehe Figur 1, Fall C), über der die Schmelze am Bohrungsgrund beschleunigt wird, erreichbar.

Zylindrische und konische Bohrungsgeometrien sind bei reproduzierbarer Qualität durch das Einstellen der räumlichen Verteilung der Intensität am Bohrungsgrund und Steuern des Bohrungsdurchmessers, wie dies vorstehend angegeben ist, einstellbar.

Wie anhand der Figur 1 weiterhin zu erkennen ist, führen Abweichungen von den vorstehend angegebenen Vorschriften, z.B. dann, wenn der Intensitätsgradient zu klein ist (siehe Figur 1, Fall D) und/oder Strecke  $w_0$  innerhalb derer die Intensität im Laserstrahl abfällt, zu klein ist (siehe Figur 1, Fall E), zu einem unvollständigem Schmelzaustrieb. Im Vergleich zu den vorstehend angegebenen Vorschriften können z.B. mit nahezu rechteckförmiger Verteilung der Intensität (siehe Figur 1, Fall E) kleinere Bohrungsdurchmesser erreicht werden. Allerdings wird hierbei die Vorschrift zur Einstellung der räumlichen Verteilung der Intensität am Bohrungsgrund verletzt und die Qualität der Bohrung wird kleiner, da die Schmelze nicht vollständig ausgetrieben werden kann.

Beim Bohren von Mehrschichtsystemen, d.h. beim Bohren unterschiedlicher Werkstoffschichten, werden zur Realisierung definierter Bohrungsdurchmesser die verschiedenen Werkstoffeigenschaften bei der Wahl der geeigneten Intensitätsverteilung berücksichtigt, so dass insbesondere beim Übergang von einer Werkstoffschicht zur nächsten Anpassungen in der Intensitätsverteilung vorgenommen werden müssen. Der Übergang zwischen zwei Schichten ist durch Änderungen in der Prozessmission (z. B. Plasmaleuchten) beobachtbar und kann durch koaxiale oder laterale Hochgeschwindigkeitsfotografie detektiert werden.

In einem bevorzugten Verfahrensablauf wird die ausströmende Schmelze zusätzlich entlang der Bohrungswand geeignet beheizt.

Hierzu ist in Figur 2 der beigefügten Zeichnung schematisch die Verteilung der Intensität im Laserstrahl und die Anordnung der zusätzlichen Heizquellen dargestellt.

Es ist zu beachten, dass, sobald der eingestellte Bohrungsdurchmesser  $2r_B$  erreicht ist, das zusätzliche Heizen der Bohrungswand einsetzen muss, und die Heizleistung muss mit der Bohrtiefe zunehmen.

Es sollte darauf geachtet werden, dass die Heizquelle innerhalb der Bohrung wirkt, möglichst nur die strömende Schmelze erwärmt und dass die primäre Energiequelle (Bohrlaserstrahl) nicht beeinflusst wird (z.B. Absorption von Bohrlaserstrahlung im Bohrkanal) und der zentrale Bereich der Bohrung möglichst unbeeinflusst bleibt.

Wie anhand der Figur 2 ersichtlich ist, sollte die räumliche Wirkung der Energiequellen über den Bohrungsdurchmesser so verteilt sein, dass der Bohrungsgrund eine genügend große Breite  $2r_B$  erreicht, die größer als die Breite  $2w_0$  des Bohrlaserstrahls ist, innerhalb derer die Intensität in radialer Richtung annähernd monoton abfällt, und dass die Bohrungswand beheizt wird.

In einer bevorzugten Maßnahme wird die Heizstrahlung über eine Strahlformung im Resonator erzeugt derart, dass die Intensität des Laserstrahls zur Beheizung der Bohrungswand ringförmig eingestrahlt wird. Hierbei kann die Erzeugung der Heizstrahlung durch Anregung höherer Moden mindestens nach Erreichen des vorbestimmten Bohrungsdurchmessers erfolgen. Es ist auch möglich, die Erzeugung der Heizstrahlung durch Blenden vorzunehmen, wobei dann der zentrale Bereich des Laserstrahls ausgeblendet wird.

Eine alternative Möglichkeit besteht darin, die Laserstrahlung zum Beheizen der aus der Bohrung ausströmenden Schmelze durch eine optische Komponente außerhalb des Resonators so zu formen, dass ein zentraler Bereich des Laserstrahls den vorbestimmten Bohrungsdurchmesser erzeugt und ein ringförmiger äußerer Bereich des Laserstrahls zur Beheizung der Bohrungswand eingestrahlt wird. Als optische Komponente kann außerhalb des Resonators ein Axikon eingesetzt werden.

Die Heizstrahlung zum Beheizen der aus der Bohrung ausströmenden Schmelze kann auch über eine zweite Energiequelle in Form thermischer Energie in das Bohrloch eingekoppelt werden. Die Heizstrahlung kann über mehrere ringförmig angeordnete Diodenlaser, über eine thermische Lichtquelle erfolgen, wobei als thermische

Lichtquelle eine Halogenlampe, eine Bogenlampe oder eine Dampflampe eingesetzt werden kann.

Die Heizstrahlung kann auch über eine Laserstrahlquelle erzeugt werden, wobei das erzeugte Plasma als sekundäre Heizquelle an der Wand der Bohrung wirkt.

Zur Erzeugung der Heizstrahlung kann dieselbe Laserstrahlquelle wie für das Bohren eingesetzt werden.

Die Steuerung der Heizstrahlung kann durch Rückführung von Signalen aus einer koaxialen oder lateralen Hochgeschwindigkeitsfotografie erfolgen.

Von den vorstehend angegebenen Maßnahmen zum Beheizen der Bohrungswand sind insbesondere ringförmig angeordnete Diodenlaser oder thermische Lichtquellen zu bevorzugen, da für die ringförmig angeordneten Diodenlaser die Heizwirkung und der Wirkbereich flexibel eingestellt werden können oder für die thermischen Lichtquellen der technische Aufwand zur Realisierung der Vorrichtung zum Heizen klein ist.

Die Steuerung der Heizstrahlung, z. B. durch laserinduziertes Plasma, kann ebenso wie die Steuerung der abtragenden Laserstrahlung bei Mehrschichtsystemen, mit einer koaxialen bzw. lateralen Prozessüberwachung, z. B. durch Hochgeschwindigkeitsfotografie oder Kurzzeitspektroskopie, umgesetzt werden.

Die Erfindung ist immer dann einsetzbar, wenn beim Einzelpuls- oder Perkussionsbohren mit Laserstrahlung der überwiegende Anteil des Werkstoffes in der flüssigen Phase (Schmelze) ausgetrieben wird.

In der Energie- und Luftfahrttechnik werden Kühlbohrungen in Turbinenkomponenten mit der Technik des Perkussionsbohrens eingebracht, um die Komponenten aus hochtemperaturbeständigen Werkstoffen mit keramischen Wärmedämmenschichten (Mehrschichtsysteme) zusätzlich vor den großen thermischen Belastungen zu schützen. Um den Wirkungsgrad weiter steigern zu können, wird eine bessere Verteilung der Kühlluft auf den Oberflächen der Turbinenschaufeln und Brennkammerplatten gefordert. Diese kann nur durch eine definierte Bohrungsgeometrie (zylindrisch

und/oder konisch) und eine größere Anzahl von Bohrungen pro  $\text{cm}^2$  (bis zu 100 Bohrungen /  $\text{cm}^2$  statt derzeit 0,75 Bohrungen /  $\text{cm}^2$ ) erreicht werden. Allerdings sind die Bohrdauer (z.B. Trepanieren) zu groß und das derzeit erreichte Aspektverhältnis bei schwankender Bohrungsgeometrie nicht ausreichend, um eine nennenswerte Steigerung des Wirkungsgrades nur durch die Erhöhung der Anzahl der Bohrungen pro  $\text{cm}^2$  zu erlangen. Außerdem ist das Vermeiden von Ablagerungen aus erstarrter Schmelze im Bohrungsschacht und die Gratbildung von wesentlicher Bedeutung, um keine Veränderung der strömungstechnisch bevorzugten geometrischen Form der Bohrung zu verursachen.

In der Automobiltechnik werden Kraftstofffilter mit Laserstrahlung bei geringeren Anforderungen an die Präzision gebohrt. Bei den durchfluss- und spraybestimmenden Bohrungen in Einspritzventilen, -drosseln und -düsen sind Abweichungen von der Normgeometrie von wenigen  $\mu\text{m}$  und ebenso kleine Dicken der Schmelzablagerungen, sowie scharfkantige Bohrungsein- bzw. -austritte mit sehr großen Krümmungen gefordert.

Den vorstehenden Forderungen kann mit dem Verfahren gemäß der Erfindung entsprochen werden.

Fraunhofer-Gesellschaft zur  
Förderung der angewandten Forschung e.V.  
Hansastraße 27c  
80686 München

24. März 2004 (ILT/LLT)

### Patentansprüche

1. Verfahren zum Bohren von metallischen Werkstoffen sowie von geschichteten metallischen Werkstoffen und solchen, die mindestens eine keramische Schicht aufweisen, mittels Laserstrahlung, wobei die Intensität des Laserstrahls abhängig von der geforderten geometrischen Form der Bohrung eingestellt wird, dadurch gekennzeichnet, dass die räumliche Verteilung der Intensität im Laserstrahl, bezogen auf den sich ändernden Boden der Bohrung, so eingestellt wird, dass die Intensität über eine genügend große Strecke  $w_0$  mit dem Abstand  $w$  von der Laserstrahlachse abfällt, dieser Abfall annähernd monoton erfolgt, und eine genügend große räumliche Änderung  $\Delta I$  der Intensität  $I$  innerhalb der Strecke  $w_0$  eingehalten wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Strecke  $w_0$  annähernd proportional zur Wurzel der vordefinierten und zu erreichenden Bohrungstiefe  $\ell$  eingestellt wird.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass die räumliche Änderung  $\Delta I$  der Intensität  $I$  innerhalb der Strecke  $w_0$  annähernd proportional zu der vordefinierten bzw. zu erreichenden Bohrungstiefe  $\ell$  so eingestellt wird, dass ein Bohrungsradius  $r_B$  ( $r_B > w_0$ ) größer als die Strecke  $w_0$  erreicht wird.

4. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der minimale Durchmesser  $d_{\min}$  ( $=2r_{B\min}$ ) der Bohrung und das maximale Aspektverhältnis  $\alpha$  von Bohrungstiefe  $\ell$  zu Bohrungsdurchmesser  $d$  durch folgende Vorschrift

$$\alpha < \text{const. } \Delta I w_0$$

eingestellt wird, wobei die räumliche Änderung  $\Delta I = I_0 - I_{w_0}$  der Intensität  $I$  innerhalb der Strecke  $w_0$  und  $I_0$  die Intensität auf der Laserstrahlachse und  $I_{w_0}$  die Intensität im Abstand  $w_0$  von der Laserstrahlachse ist.

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass zur Vergrößerung des Bohrungsdurchmessers  $d$  ( $=2r_B$ ) während des Bohrens der Maximalwert  $I_0 > I_{\min}$  für die Intensität so gesteuert oder geregelt wird, dass der Bohrungsdurchmesser  $d$  ( $=2r_B$ ) einen vorbestimmten von der Tiefe abhängigen Wert  $d > d_{\min}$  erreicht, wobei  $I_0$  die Intensität auf der Laserstrahlachse ist und  $I_{\min}$  der minimale Wert der Intensität  $I_0$  ist.
6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass zur Vergrößerung des Bohrungsdurchmessers  $d$  ( $=2r_B$ ) während des Bohrens die Strecke  $w_0 > w_{\min}$  so gesteuert oder geregelt wird, dass der Bohrungsdurchmesser  $d$  ( $=2r_B$ ) einen vorbestimmten von der Tiefe abhängigen Wert  $d > d_{\min}$  erreicht, wobei  $w_0$  der radiale Abstand von der Laserstrahlachse ist und  $w_{\min}$  der minimale Abstand von der Laserstrahlachse ist über der die räumliche Änderung  $\Delta I$  erfolgt.
7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, dass beim Bohren unterschiedlicher Werkstoffschichten beim Übergang von einer Werkstoffschicht zur nächsten eine Anpassung der Intensitätsverteilung der Laserstrahlung vorgenommen wird derart, dass in beiden Werkstoffschichten derselbe bzw. der vorbestimmte von der Tiefe abhängige Bohrungsdurchmesser erreicht wird.

8. Verfahren nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, dass der Übergang zwischen zwei Werkstoffschichten durch Änderung der Prozessemisionen überwacht wird.
9. Verfahren nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, dass die Änderung der Prozessemisionen durch koaxiale oder laterale Hochgeschwindigkeitsfotografie detektiert wird.
10. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 9, dadurch gekennzeichnet, dass bei Erreichen eines eingestellten Bohrungsdurchmesser  $d$  ( $=2r_B$ ) eine zusätzliche Beheizung der Bohrungswand vorgenommen wird.
11. Verfahren nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, dass die Heizleistung mit zunehmender Tiefe der Bohrung erhöht wird.
12. Verfahren nach Anspruch 10 oder 11, dadurch gekennzeichnet, dass die Beheizung auf die aus der Bohrung ausströmende Schmelze beschränkt wird.
13. Verfahren nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, dass die Heizstrahlung über eine Strahlformung im Resonator erzeugt wird derart, dass die Intensität des Laserstrahls zur Beheizung der Bohrungswand ringförmig eingeschossen wird.
14. Verfahren nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, dass die Erzeugung der Heizstrahlung durch Anregung höherer Moden mindestens nach Erreichen des vorbestimmten Bohrungsdurchmessers erfolgt.
15. Verfahren nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, dass die Erzeugung der Heizstrahlung durch Blenden erfolgt, wobei der zentrale Bereich des Laserstrahls ausgeblendet wird.
16. Verfahren nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, dass die Laserstrahlung durch eine optische Komponente außerhalb des Resonators so geformt wird, dass ein zentraler Bereich des Laserstrahls den vorbestimmten Bohrungsdurchmesser erzeugt und ein ringförmiger äußerer Bereich des Laserstrahls zur Beheizung der Bohrungswand eingestrahlt wird.

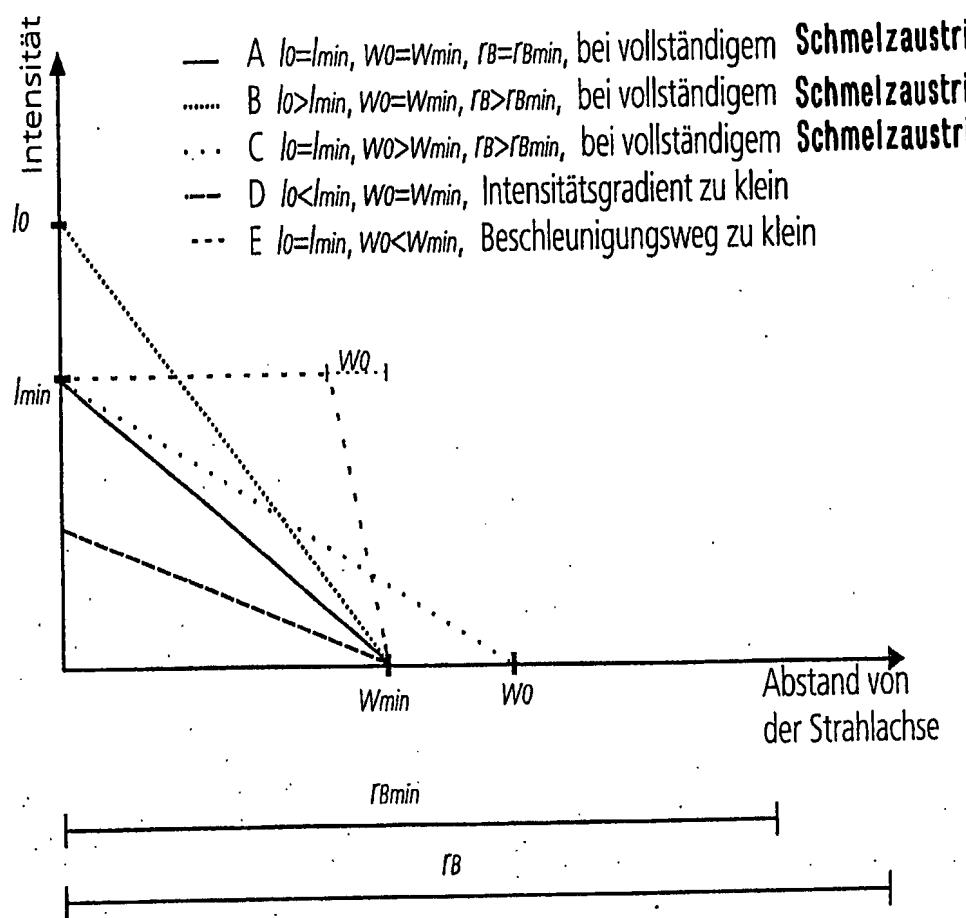
17. Verfahren nach Anspruch 16, dadurch gekennzeichnet, dass als optische Komponente außerhalb des Resonators ein Axikon eingesetzt wird.
18. Verfahren nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, dass die Heizstrahlung über eine zweite Energiequelle in Form thermischer Energie in das Bohrloch eingekoppelt wird.
19. Verfahren nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, dass die Heizstrahlung über mehrere ringförmig angeordnete Diodenlaser erzeugt wird.
20. Verfahren nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, dass die Heizstrahlung über eine thermische Lichtquelle erzeugt wird.
21. Verfahren nach Anspruch 20, dadurch gekennzeichnet, dass als thermische Lichtquelle eine Halogenlampe eingesetzt wird.
22. Verfahren nach Anspruch 20, dadurch gekennzeichnet, dass als thermische Lichtquelle eine Bogenlampe eingesetzt wird.
23. Verfahren nach Anspruch 20, dadurch gekennzeichnet, dass als thermische Lichtquelle eine Dampflampe eingesetzt wird.
24. Verfahren nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, dass die Heizstrahlung über eine Laserstrahlquelle erzeugt wird, wobei das erzeugte Plasma als sekundäre Heizquelle an der Wand der Bohrung wirkt.
25. Verfahren nach Anspruch 24, dadurch gekennzeichnet, dass zur Erzeugung der Heizstrahlung dieselbe Laserstrahlquelle wie für das Bohren eingesetzt wird.
26. Verfahren nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, dass die Steuerung der Heizstrahlung durch koaxiale oder laterale Hochgeschwindigkeitsfotografie detektiert wird.

Fraunhofer-Gesellschaft zur  
Förderung der angewandten Forschung e.V.  
Hansastraße 27c  
80686 München

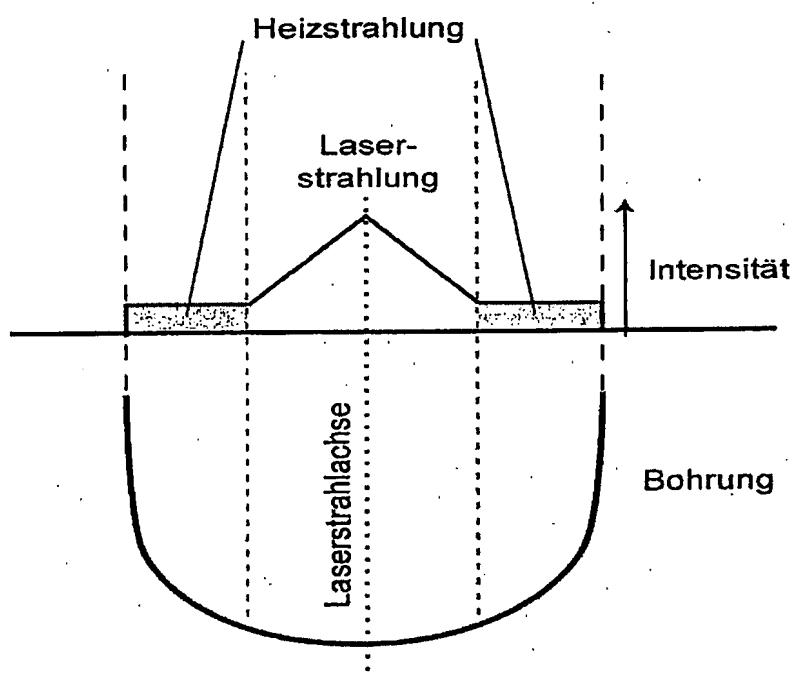
24. März 2004 (ILT/LLT)

### Z u s a m m e n f a s s u n g

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Bohren von metallischen Werkstoffen sowie von geschichteten metallischen Werkstoffen und solchen, die mindestens eine keramische Schicht aufweisen, mittels Laserstrahlung, wobei die Intensität des Laserstrahls abhängig von der geforderten geometrischen Form der Bohrung eingestellt wird, das dadurch gekennzeichnet ist, dass die räumliche Verteilung der Intensität im Laserstrahl, bezogen auf den sich ändernden Boden der Bohrung, so eingestellt wird, dass die Intensität über eine genügend große Strecke  $w_0$  mit dem Abstand  $w$  von der Laserstrahlachse abfällt, dieser Abfall annähernd monoton erfolgt, und eine genügend große räumliche Änderung  $\Delta I$  der Intensität  $I$  innerhalb der Strecke  $w_0$  eingehalten wird.



Figur 1



**Figur 2**